

Гладковский С. В., Каманцев И. С., Владимиров А. П.,
Смирнов А. С., Мушников А. Н., Веселова В. Е.
ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В ДВУХФАЗНОЙ ($\gamma + \epsilon$) МЕТАСТАБИЛЬНОЙ Fe–Mn СТАЛИ

Проведено комплексное изучение процесса зарождения и кинетики роста УТ в метастабильной стали 05Г20С2 неразрушающими методами контроля по сопутствующим образованию усталостной макротрещины изменениям физических характеристик и эволюции поверхности образца в пределах локализованной зоны пластической деформации (ЛЗПД) в ее вершине.

Ключевые слова: *трещиностойкость, неразрушающие методы контроля, усталостная трещина, метастабильная сталь.*

Возможности использования различных физических методов для изучения процессов зарождения и роста усталостной трещины (УТ), в том числе без остановки циклического нагружения, показаны в работах [1, 2]. В настоящее время в экспериментальной механике деформирования и разрушения находят широкое применение как физические методы контроля (магнитные, тепловизионные, акустико-эмиссионные и др.), так и оптические методы фотоупругости, муаровых полос, корреляции цифровых изображений, а также голографическая и лазерная спекл-интерферометрия [3, 4]. Целью данной работы являлось комплексное изучение процесса зарождения и кинетики роста УТ в метастабильной стали 05Г20С2 неразрушающими методами контроля по сопутствующим образованию усталостной макротрещины изменениям

физических характеристик и эволюции поверхности образца в пределах локализованной зоны пластической деформации (ЛЗПД) в ее вершине.

Материал и методика исследования

Проведение циклических испытаний осуществлялось на СТ-образцах размером $30 \times 32 \times 2,6$ мм, изготовленных из метастабильной двухфазной ($\gamma + \epsilon$) стали 05Г20С2, с концентратором напряжений в виде острого V-образного надреза с радиусом в вершине 0,25 мм (тип III по ГОСТ 25.506-85). После фрезерования и тонкой шлифовки наблюдаемая сторона образца была подвергнута полировке. Циклическое нагружение по схеме внецентренного растяжения проводилось на высокочастотной резонансной испытательной машине MIKROTRON фирмы RUMUL с максимальным усилием цикла 1,3 кН при частоте нагружения ≈ 100 Гц и коэффициенте асимметрии цикла 0,1.

Полученные результаты и обсуждение

Тепловизионный метод. Известно [5], что в результате приложенных циклических напряжений в вершине УТ происходит эволюция структуры материала, приводящая к диссипации тепла, что делает возможным раннее обнаружение образования трещин методами инфракрасной термографии [6]. В связи с этим были проведены тепловизионные исследования с использованием тепловизора NEC TN9100WL с диапазоном измеряемой температуры от -40 до 2000 °С, результаты которых представлены на рис. 1. Как видно из рис. 1, заметные изменения температурного поля на поверхности образца зарегистрированы после достижения $3,3 \times 10^5$ циклов нагружения и соответствующей длины трещины 5,85 мм при величине размаха коэффициента интенсивности напряжений $\Delta K = 33 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. Последующее циклическое нагружение вызывает все больший нагрев материала образца в вершине растущей УТ.

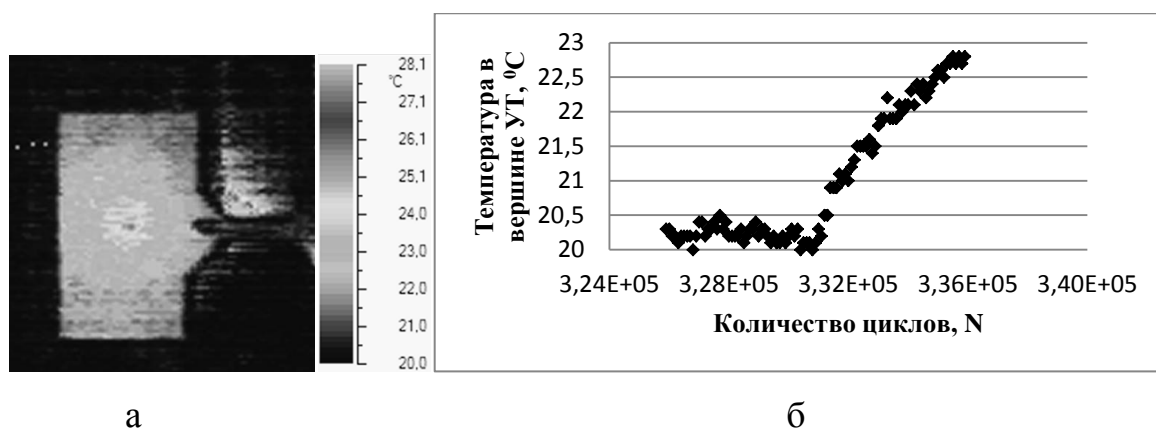


Рис. 1. Температурное поле боковой поверхности нагружаемого образца – а;
изменение температуры в вершине УТ – б

Магнитный метод. В работе [7] показано, что при пластическом деформировании метастабильных сталей на Fe–Mn и Fe–Mn–Cr основах происходит активное образование ГПУ ϵ -мартенсита, а при достижении более высокой степени деформации – α' -мартенсита. Возможность регистрации α' -мартенсита в сталях данного состава при статическом нагружении прецизионным магнитным методом показана в работе [8]. Однако при циклическом нагружении область, подвергнутая пластической деформации в вершине концентратора напряжений, мала по сравнению с основным объемом всего образца, что может существенно затруднить фиксацию изменения магнитных характеристик материала. Вместе с тем образование в вершине УТ ферромагнитной α' -фазы в исходно парамагнитном материале может существенно усилить возможности применения методов магнитного анализа и стать одним из эффективных способов выявления УТ и изучения кинетики ее роста.

Изменения магнитных характеристик образца из стали 05Г20С2 изучались методом замера магнитных шумов Баркгаузена, регистрируемых с помощью цифрового анализатора Microscan 600 за 10 циклов перемангничивания. В качестве информативных параметров были выбраны среднеквадратичные значения напряжения RMS (В) и коэрцитивная сила H_c (кА/м). Первичным

преобразователем служил накладной датчик с сечением полюсов 3×8 мм и расстоянием между полюсами 4 мм. Амплитуда напряжения и частота тока перемагничивания составляли соответственно 5 В и 95 Гц. Измерения проводились в нескольких точках вдоль и поперек предполагаемой траектории УТ. В исходном состоянии значения регистрируемых параметров составляли $RMS = 23 \pm 0,5$ и $H_c = 0,02 \pm 0,005$ во всех исследованных направлениях. При этом магнитная восприимчивость была положительной, что свидетельствовало о парамагнитном состоянии материала. Предполагаемый момент зарождения УТ магнитными параметрами зафиксировать не удалось, так как среднеквадратичные значения напряжения и коэрцитивная сила оставались на уровне исходного состояния. При подрастании УТ до длины 0,3 мм, наблюдались заметные изменения магнитных параметров, что объясняется появлением α' -мартенсита деформации. При измерении вдоль направления роста УТ значения параметров $RMS = 25 \pm 0,5$, $H_c = 0,05 \pm 0,005$. Параметры, измеренные поперек УТ, незначительно больше, чем в исходном состоянии. Это может быть связано с тем, что область измерения при расположении датчика поперек УТ преимущественно состоит из недеформированного металла с парамагнитными свойствами. На удалении 8 мм от вершины УТ магнитные параметры идентичны параметрам образцов в исходном состоянии. При увеличении УТ до 8 мм зафиксирован равномерный рост магнитных параметров по всей длине УТ, при этом значения $RMS = 27 \pm 0,5$ и $H_c = 0,075 \pm 0,005$ в вершине УТ совпадают со значениями у ее основания.

Метод спекл-интерферометрии. Для изучения процесса зарождения УТ в стали 05Г20С2 без остановки циклического нагружения был использован предложенный в работе [9] метод корреляции усредненных во времени спекловых изображений. Регистрация спекл-полей осуществлялась с помощью оптической системы, размещенной на испытательной машине и состоящей из лазерного модуля типа KLM-H650-40-5 и телекамеры. Картины спеклов регистрировали в плоскости изображения образца через каждые 2000 циклов

нагружения. Анализ изменения рельефа поверхности образца в вершине растущей трещины проводился на оптическом профилометре WYKO NT-1100 с погрешностью измерения высоты 3 нм. На рис. 2 (а, б) приведены профиль поверхности образца и распределение величины η в момент появления усталостной трещины и локализованной зоны пластической деформации (ЛЗПД) в ходе циклического нагружения.

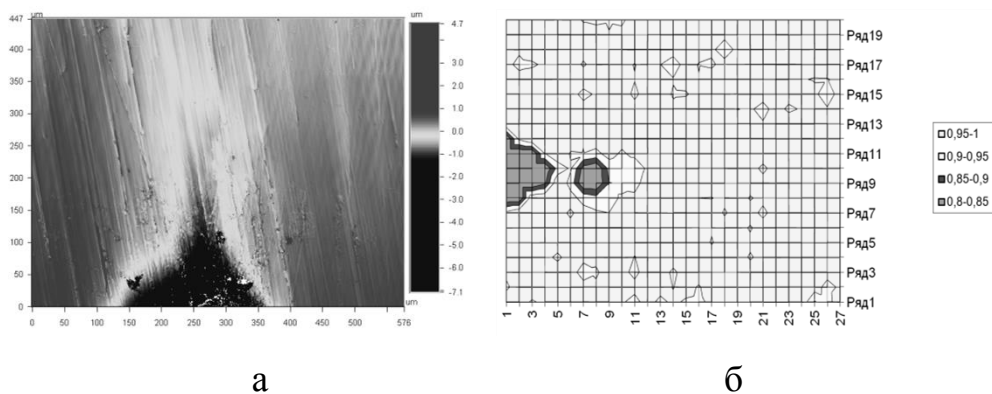


Рис. 2. а – профиль поверхности образца с УТ длиной 0,3 мм,
б – распределение величины η в вершине УТ

Как видно из рис. 2, форма и размер ЛЗПД в вершине трещины, зафиксированной методом оптической профилометрии, и распределение величины η определенное методом спекл-интерферометрии, хорошо совпадают.

Таким образом, на основе проведенного комплексного исследования кинетики роста УТ в образце из метастабильной стали 05Г20С2 такими методами, как магнитный и тепловизионный контроль, оптическая профилометрия и лазерная спекл-интерферометрия, показано, что использованные средства НК позволяют достоверно оценивать момент появления и кинетику роста УТ. Однако в связи с высокой степенью локализации пластической зоны в вершине циклически подрастающей трещины разрешение регистрирующей аппаратуры должно быть соизмеримо с размером области предразрушения в пределах ЛЗПД.

Исследования проведены с использованием оборудования ЦКП «Пластометрия». Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-08-31673 мол-а и Программы Президиума РАН № 25.

Литература

1. Magnetic nondestructive evaluation of fatigue damage of ferromagnetic steels for nuclear fusion energy systems / A. Gilanyi, K. Morishita, T. Sukegawa, M. Uesaka, K. Miya // *Fusion Engineering and Design*. 1998. V. 42. С. 485–491.
2. Плехов О. А, Пантелеев И. А., Леонтьев В. А. Особенности выделения тепла и генерации сигналов акустической эмиссии при циклическом деформировании армко-железа // *Физическая мезомеханика*. 2009. Т. 12. № 5. С. 37–43.
3. Разумовский И. А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. 240 с.
4. Экспериментальные исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях / В. Э. Вильдеман, М. П. Третьяков [и др.]; под ред. В. Э. Вильдемана. М.: Физматлит. 2012. 204 с.
5. Wells A. A. The Mechanics of Notch Brittle Fracture // *Welding Research*. 1953. V. 7. № 2. P. 34–56.
6. Вавилов В. П. Динамическая тепловая томография (обзор) // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2006. Т. 72, № 3. С. 26–36.
7. Богачев И. Н., Еголаев В. Ф. Структура и свойства железомарганцевых сплавов. М.: Металлургия, 1973. 295 с.
8. О возможности магнитного неразрушающего контроля упругопластических деформаций в сталях с метастабильным аустенитом / Э. С. Горкунов, М. Б. Ригмант, С. В. Гладковский [и др.] // *Журнал Российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике «Контроль. Диагностика»*. 2000. № 9 (27). С. 62–63

9. Каманцев И. С. Владимиров А. П., Бородин Е. М. Исследование процессов зарождения трещин при многоцикловой усталости трубной стали 09Г2С с использованием метода спектро-интерферометрии // Вестник ТГУ. 2013. Т. 18. Вып. 4. С. 1881–1882.